

国际等离子体科学与技术会议

朱清文

(中国科学院力学研究所)

提要 在国际等离子体科学与技术会议上共提出论文 117 篇, 代表了在这个领域中最近的发展和成就。论文集分综述、热等离子体(近平衡)和低气压等离子体(非平衡)三个部分。热等离子体方面包括基本过程和模型, 诊断, 等离子体系统, 熔化和气化, 冶金, 化工过程和热解。低气压等离子体方面包括基本过程和模型, 诊断, 聚合和表面处理, 蚀刻和沉积。

本文包括两部分, 即会议概况, 主要学术内容, 会议特点和等离子体技术前景。

关键词 低温等离子体; 热、冷等离子体; 平衡、非平衡等离子体; 高压、低气压等离子体

I. 概况

国际等离子体科学与技术会议(ICPST)于1986年6月4—7日在北京香山饭店举行, 由中国力学学会和北京市等离子体学会共同主办。13个国家(加拿大、捷克、法国、联邦德国、民主德国、日本、荷兰、波兰、瑞士、英国、美国、苏联和中国)的139名代表(外国代表44名)出席, 提出了117篇论文(表1)。会议促进了中外科技工作者之间的学术交流, 增进了相互了解。会议论文集将由 Pergamon 出版社再版。美国工程科学院院士 Pfender 表示, 他将向其他同行提议, “第10届国际等离子体化学会议(ISPC-10)”在中国召开。这次会议取得了很大的成功。

会议的学术指导委员会由中国、美国、日本、英国与苏联的科学家组成。在全体会议上宣读了7篇专题综述报告。其他论文根据热等离子体与低气压等离子体的不同专题, 在四个小组会上宣读和讨论。此外, 还进行了“热等离子体的基本过程与应用”及“低气压等离子体的基本过程与应用”两个专题的自由讨论。国内外八家厂商在会议期间举办了展览会。外国代表还参观了中国科学院力学研究所与清华大学的等离子体实验室。

II. 主要学术内容

根据论文集分类, 将各部分主要内容简要说明如下。

1. 概述 等离子体发生和气体放电是等离子体技术发展的重要问题。Zhukov 详细阐述了电弧等离子体发生的物理问题。他指出, 由于等离子体发生器中的复杂过程, 有时等离子体包括各种不同性质、不同作用的粒子(分子, 根, 原子, 荷电粒子等), 经受各种传输过

表 1 各国所提论文分类篇数统计

国别	篇数	分类	热等离子体						低气压等离子体				总计
			综述	A	B	C	D	E	F	A	B	G	
苏联	1		6				4		1			3	15
美国	1		3						0.5			2	6.5
日本				1					4		2		7
罗马尼亚									8		1		9
波兰					2			3.5			1	2	8.5
加拿大			0.5		1		1	0.5					3
联邦德国	1					1			2			2	6
民主德国			1									1	2
瑞士	1					1							2
荷兰	1												1
法国						1							1
澳大利亚									0.5				0.5
捷克									1			2	3
奥地利									1				1
中国	2		13.5	2	5	5	3	4	4	2	10	1	51.5
总计	7		24	3	8	8	8	8	22	2	14	13	117

备注: A 基本过程和模型 B 诊断 C 等离子体系统 D 熔化和气化 E 冶金 F 化学合成和热解
G 聚合和表面处理 H 刻蚀和沉积
两国合写的论文, 每国算 0.5 篇

程(热传输和电传导等), 此外, 还有电弧同壁面相互作用, 有时还发生化学反应和存在着外磁场。这些都使分析变得非常复杂。完全严格地解决电弧、气流、磁场和等离子体发生器壁面的作用问题, 是迄今连续介质力学所遇到的最困难的问题。现在只有一些简化模型描述了一些简单现象。在复杂现象的研究中运用相似准则和半经验公式, 在苏联得到了发展。对“分流”, 电弧和环境气体作用, 相似准则, 热边界层, 高温气体对壁面的热损失, 对流传热, 气膜冷部, 气体通过多孔壁喷射, 创造高效率等离子体发生器和高强电场强化弧功率等方面, 都进行了广泛研究。特别对近电极过程的研究使电极消耗小了两个数量级。过增元等对电弧由于焦耳加热对气体流动特性的反作用——电弧阻塞, 以及磁场在弧柱内部引起的影响——磁感应流, 作了详细的介绍。

Kistemaker 介绍了气体放电的基本问题。由于辉光放电的应用是表面蚀刻、清洗和离子注入, 辉光放电的发展进入到异常电流区, 这导致激烈的阴极加热, 在电压足够高时, 电子发射将导致气体的二次击穿。对于产生洁净高温无电极放电等离子体装置的发展, 输运现象如电导率和荷电质点扩散对于在托卡马克中约束和加热等离子体, 导致氢同位素的热核聚变的重要作用, 也作了介绍。

Pinckamp 介绍了通过等离子体物理、流体力学、材料科学、物理化学和电弧技术物理机制的研究,极大地改善了电路开关的设计,并给出了应用这些理论的成功例子。

Steffens 等介绍了等离子体喷涂的现状和展望。指出等离子体喷涂已有广泛的应用,除喷涂金属材料外,某些氧化物陶瓷、碳化物、硼化物、氮化物、硅化物、金属陶瓷和一些塑料亦可用于喷涂材料。对喷涂用于航空的可能性,质量控制(特别是无损测试方法),不同喷涂方法得到的质量特性和性能,都作了讨论。特别注意最近发展的低气压等离子体喷涂。

吴承康详细介绍了中国在低温等离子体技术方面的研究与进展。在热等离子体方面,功率为 5MW 的直流电弧加热器已用于宇航工程,用来研究材料的烧蚀和再入飞行器周围等离子体鞘层。数百千瓦的直流、交流和高频等离子体发生器,在工业中用来研究天然气裂解制备乙炔和原油裂解制备乙炔和乙烯,制取耐热的、超硬的、超细粉及超纯材料(有 TiN, Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiO_2 , TiO_2 等),熔解及精炼各种金属和合金,制取钼铁、钨和二氧化锡等。等离子体喷涂已应用于飞机发动机的喷管、冶金装备、合成纤维机械、阀门的密封表面、发动机部件、叶片,甚至人工关节。在冷等离子体方面,用低压辉光放电处理聚酯纤维、兔毛、苧麻纤维等。用等离子体聚合各种功能的和保护的涂层,用回旋共振等离子体源刻蚀微电子部件和淀积 Si_3N_4 ,用直流辉光放电清洗核聚变装置中的不锈钢表面,离子镀用于制备硬质表面。在诊断方面,发展了一整套热力学诊断方法,包括压力探针、焓探针、扫描型零点热量计、多色和辐射高温计。还发展了光谱、激光干涉和朗缪尔探针技术等。在基本理论方面,对直流、交流和高频等离子体发生器中的基本理论和应用的一些理论问题进行了研究,并建立了用于制备 Si_3N_4 粉末的高频等离子体 CVD 反应器模型。在学术活动方面也非常活跃,从 1980 年起,每两年召开一次全国性学术会议。

2. 热等离子体(近平衡)

①基本过程和模型 等离子体与粒子的相互作用是一个很重要的研究课题,在这方面进行了很多研究。陈熙对各国研究者广泛使用的等离子体向粒子传热的表达式作了评定。对于雷诺数为零,即纯导热情形,以精确解作比较标准;对于实际有相对速度的情形,以数值解变物性微分方程组的结果作为比较标准。根据比较结果,作者给出了推荐的粒子传热表达式。Krylov 等考虑不稳定传热和扩散,对包层粒子如 Ni 在 Al 液中的溶解和淀积过程进行了分析,把过程分为 4 个特性阶段:1) Al 核心和 Ni 壳层组成的双层固体粒子,2) Al 核心熔化和固体 Ni 壳层随 Al 的熔化而溶解,3) Al 核心熔化停止, Ni 继续溶解,4) Ni 壳层开始熔化。Temko 等研究了含灰等离子体中粒子有效互作用的电位问题,这是由于固体粒子的相互摩擦变成了荷电粒子并形成电场,改变了气体和蒸气的介电性质。为了了解含灰等离子体的物理化学性质,在描述粒子间相互作用时,必须考虑这个问题。陈乐山和 Munz 计算了转移弧等离子体炉中不同工作状态下,旋转进入反应炉的粒子开始熔化的位置。熔化粒子与表面的相互作用也是一个重要的问题。有些文献研究了它的接触温度。没有人考虑熔化粒子在基板上扩展的流体力学性质。由于这个问题在低温等离子体技术如喷涂中有重要的应用,Deineko 等对这个问题同时考虑不稳定传热(对流和传导),进行了研究。

在三相工频等离子体炉方面,徐复等在不考虑辐射、对流、粘性以及传热同流体基本方程不耦合等假定下,给出了流体流动和传热的分析计算和数值计算。陈熙对同样问题,用数值解变物性方程组,考虑了实际的等离子体物性随温度的变化,电弧区以温度已知的区域替

代,对炉中的流动与传热进行了数值解。计算表明,自然对流有着重大影响,辐射在传热过程中起重要作用。Ashinmov 用相似 π 定理分析了电弧炉中电磁场对难熔金属的作用。荣陞对移动边界交流电弧的特性作了分析。

在高频等离子体方面,赵国英、朱清文对高频等离子体 CVD 氮化硅反应器进行了数值模拟。模型包括灯炬和反应器,用实际的多成分气体,考虑扩散,使模型接近实际方面进了一步。在脉冲功率应用中,感应能量贮存有很大优越性,关键技术之一是发展操作开关。Schaefer 等研究了电子束控制的 Ar-C₂F₆ 混合气扩散放电的负微分电导率特性,并把这一特性用于其开关系统。

在电弧等离子体方面,应用中存在的主要问题之一是电弧位置的不稳定,电弧常沿着电极表面轴向移动,影响出口射流的均匀性与定常性和电弧参数的提高,而且可能烧坏电极或绝缘。中国科学院电工所通过对磁旋单电弧和双电弧的两种同轴圆筒型电弧加热器的实验研究解决了这个问题。

在基本性质方面,韩隆恒给出了低温等离子体热力学数据的工程计算方法。陈国荣等研究了碱金属等离子体中的状态方程和相关性质。Sinjarev 讨论了低温等离子体中的现代热力学问题。Trusov 计算了相平衡和化学平衡。Klotz 等用激波管研究了等离子体裂解甲烷转换率的问题,目的是建立一个最佳转换率的动力学模型。

飞行器再入大气层后,在其周围形成等离子体鞘层,它使飞行器与地面站的通讯受到影响,严重时会出现通讯中断现象。徐燕侯等采用不等分分段模式,利用不变量镶嵌原理,给出电磁波功率透射系数和功率反射系数等计算公式。Robert 对改善 MHD 激光器的理论模型进行了深入的研究,在以前模型中,没有考虑离子化不稳定性引起的电子密度和电子温度的瞬时和空间的不均匀性(这将导致等离子体容积电导率的减小),也没有考虑有限速率的分子碰撞所引起的影响。

②诊断 多成分气体电弧的激光诊断目前还是相当困难的,尽管在实际应用中大多数是多成分气体。李俊岳等用激光双镜干涉仪为基础的单波长干涉法,对直流电弧 Ar+N₂ 混合等离子体进行了诊断研究,实验证明这种方法灵敏可靠,并且由一次测量就能提供温度、粒子密度和电离度的数据。王欲知等用质谱仪直接分析 CO₂ 气体激光器中等离子体气体成分的变化,其特点是利用一极小孔把质谱仪和激光器管连接起来,使气体损失很小,在半小时内激光器中的气体压力几乎不变,并在实验室里解决了小孔的加工问题。Shizuyo 等用等离子体聚焦光源,在 Ne = 3.6 × 10¹⁷/cm³ 和 Te = 2.0 × 10⁵K 等离子体状态下,对类氢氦离子 Paschen 线向红光方向的位移作了研究,所得结果同以前的报告一致。

③等离子体系统 Reszke 等用一维 Maxwell 方程和传热方程分析了氧的微波放电,用简单的计算方法算出等离子体的温度分布和吸收的微波功率,计算值同实验值一致。同时他们发展了首先由 Massachusetts 大学发展的新型微波等离子腔,采用了条片式波导结构,能容易地把微波能量耦合到等离子体中去。

台阶式阳极电弧等离子体发生器结构简单,控制方便,弧电压高,能给出平的或升高的电压-电流特性,已被广泛研究和应用。樊友三等用实验和理论方法对这种发生器进行了研究,给出了实验的和计算的温度分布。纪崇甲等也研究了这种发生器,其弧根区阴极壁厚烧损为 1 × 10⁻⁶m/h,寿命至少为 100 小时,沙次文等介绍了他们对煤粉点火等离子体发生器

的发展和研究。黄朝松等对气体喷射式等离子体枪进一步作了试验和分析,测量了不同工作状态下的温度、速度、电流和等离子体密度的径向分布,从物理上分析了枪中等离子体的基本过程,给出了等离子体参数之间的关系。薛明伦等探讨了降低高频等离子体工作频率的问题。Chang对等离子体流化床反应器流态化和电流特性作了试验研究,给出了有等离子体和无等离子体喷射时表面速度与总压力降,总压力降与电流波形,以及压力梯度随距离变化的实验曲线。

④熔化和气化 近年来等离子体喷涂的工业化发展非常迅速,从装备方面包括机器人、机械手、计算机化和自动控制已转入对喷涂粉的质量控制。Eschauer等详细介绍了用于大气压和真空等离子体喷涂的喷涂粉材料的发展,这包括用于耐磨、耐腐、防热涂层的材料,特别强调喷涂粉质量控制,尤其是粉末形状和尺寸分布的重要性。Lugscheider等用真空等离子体喷涂钛,选择了八个最重要的可调参数(非转移弧电流密度,Ar流量,H₂流量,喷涂室压力,喷涂距离,供粉速率,转移弧电流密度,工件预热温度等)进行试验,并讨论了喷涂参数的最佳化。给出的平均涂层厚度近似为200μm,平均微硬度近似为214HV0.05。闻立时等进行的低压等离子体喷涂初步工艺实验表明,低压等离子体喷涂的涂层性能明显优于大气压下等离子体喷涂,从W, Ni Co Cr AlY/WC涂层的金相和扫描电镜照片上可以看出,低压涂层比较致密,气孔率显著减小,层状组织消失。低压喷涂的Co/WC涂层X衍射结果表明相组成在喷涂前后几乎无变化,失碳量只有5%(大气压下喷涂,高达32—40%)。魏俊全等用水收缩空气等离子体电弧切割不锈钢,一般是用N₂弧,用空气比较便宜且易获得。

Amouroux等利用等离子体/熔渣界面上的原子或分子辐射光谱来控制硅的提纯,对于含有杂质Ti, V, W, Mo, Cr, B, Al, Fe为30000ppm的冶金级硅,经过等离子体处理纯度可以接近电子工业级。陈德善等把广泛用于线表面处理的反极性的软等离子体电弧用于粉末表面处理,并进行了Co-Cr-W粉末薄膜沉积试验。

嵇震宇等研制了等离子体手术仪并进行了临床应用。临床结果表明,手术仪性能稳定,参数可调,满足外科使用要求。等离子体手术仪特别适用于切除血脉丰富的组织,可同时达到切取和止血的效果,和钢刀对比,可缩短手术时间和减轻组织坏死程度。张晓华等也进行了等离子体手术仪和临床应用研究,在肝切除和腹切口临床应用中,流血都显著减少,没有一个手术有明显的后失血、伤口感染和严重的并发症,认为手术仪是有效、安全和容易使用的。

⑤冶金 等离子体装置可有效地实现冶金过程,处理废料,制取具有新的物理、力学和化学性质的材料,可使设备小型化、自动化,增加设备产量几十倍甚至几百倍。Ashimov等用三相电弧炉熔化工业废料中的难熔物质SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, Cr₂O₃, CaO, MgO, FeO等。其特点是把一电磁感应器装入炉体,在熔化过程中,利用电磁的周期作用。这样提高效率17%,降低比能耗20%,并改善了产品结构。另外,在矿石熔化炉中,非线性负载的特点使馈送电源产生一些较高的谐波分量。这是非常不希望的。他们研究了这个问题,同时研究了熔铸氧化铝时石墨电极的烧损对产品的影响。另外他们利用拉曼光谱对等离子体合成产物中如难熔物质、超色散粉进行了分析,以确定其主要相。所用的微型激光拉曼光谱分析器,是用连续工作的Ar离子激光器作光源,功率2W,波长470—514nm。

Brow对三相工频等离子体炉的基本理论和经济性作了分析,介绍了两种炉型,一为

加拿大多伦多大学发展的 EAFR 型, 用石墨作电极; 一为德国 Krupp 研究所发展的 Krupp 型, 用钨钨作电极。通过比较, 结论是, 在大于 3 吨的炉子中, 两种炉子在经济上都可同交流电弧炉 (EAF) 相竞争。

欧阳通、曹永仙利用三相工频等离子体炉熔炼辉钼矿, 熔炼 30 分钟, 可将成分为 76.65% MoS₂ 的 16 kg 矿料熔炼成成分为 86.5% Mo 的 8 kg 半成品, 电耗为 10.8 kWh/kg Mo。耿铃用转移弧等离子体炉, 以 Ar (或 Co) 作等离子体载体, 焦炭作还原剂, 从铬铁矿生产铁-铬。郑国梁用直流电弧等离子体炉, 碳或一氧化碳作还原剂, 熔炼还原钛铁矿, 并从富集钛渣中把还原铁取出。

⑥化学合成和热解 这也是一个非常活跃的领域, 特别是在等离子体气氛中合成超微粉。Parosa 等发展了一种随机膨胀等离子体反应器 (REPR), 阳极由许多片组成, 靠均匀磁场作用使载流等离子体柱在阳极片之间滑动或跳动, 不发生转动。这样可用多孔送粉器把更多的粉送入等离子体区, 提高平均粒子密度, 并使粒子与等离子体有较长的接触时间。通过实验可以得到高纯度的 Al(OH)₃ 粉。樊友三等在直流弧等离子体反应器中用 H₂ 还原 WO₃ 得到黑色球形钨粉, 粒径小于 0.1 μ, 平均粒径为 0.06 μ, α-W 为 97%, β-W 为 3%, 氧含量约 0.3—0.6%。普达权等在电弧 H₂ 等离子体中用 CH₄ 还原 TiCl₄, 得到黑色立方结晶, 平均粒径为 0.1 μ, 晶格常数为 4.328 Å, 比表面积为 10 m²/g, 产品成分为 TiC 96%, 游离碳 ~1%, 吸附水 ~2%, 氧 (不包括吸附水中的氧) ~1%, X 射线检查不出二氧化钛。Lange 等用电弧等离子体熔炼铬铁矿 FeCr₂O₄ (作阴极) 制取铬, Ar 流 3 l/min, 弧电流 24—42 A, 电压 21 V。试验表明, 用这种熔炼氧化物作阴极可以使氧化物分解成金属铬的量增加。Szymanski 等用电弧 H₂ 等离子体射流从甲烷制取乙炔, 能耗小于 65 MJ/m³ C₂H₂, 结论是用等离子体技术制取乙炔可同其他方法 (如碳化物同天然气不完全燃烧) 相竞争。昆明工学院用电弧气化法制取二氧化锡。

朱联锡等用高频 N₂ 等离子体, 从尾焰加入 TiCl₄ 和反应气 NH₃ 进行反应制取 TiN 超微粉, 产品的晶格常数为 4.24 Å, 粒径 0.01—0.15 μ, 比表面为 21.9—45 m²/g, TiN 中 N₂ 的成分为 22.37% (理论值为 22.63 wt%)。Huczko 用高频 Ar 或 Ar-H₂ 混合气等离子体和 Cr₂O₃ 蒸气反应制取超细铬粉, 并给出详细的产品生成计算公式和分析结果, 结论是在还原性气相反应系统中制取铬粉优于通常技术。

3. 低气压等离子体 (非平衡)

①基本过程和模型 低气压等离子体的基本过程和模型有着丰富的研究内容。Atamanov 等研究了在负电子气体 (SF₆, CF₄) 中束-等离子体放电的物理性质, 这包括束电子能量分布和电子束从不同的 BPD (束-等离子体放电) 区域向等离子体传输的能量。Chang 用荷电输运方程计算了 Ar-NH₃ 混合气放电正柱中的离子成分和温度, 参数范围是, 压力为 13.3322—1333.22 Pa, NH₃ 分压为 0—10%, 等离子体密度 10⁸—10¹³/cm³, 管径 1 cm, 管长 12 cm。Pekarek 等计算了在 7.4 Pa, 4.5 kV, 0.3 A 放电室内的电子束的轮廓, 同时可确定聚焦距离, 并同照相结果相一致。Geavit 等讨论了由于在任何金属蒸气中进行低电压放电的可能性, 有可能给等离子体技术带来的一些新应用, 如热能直接转换成电能, 真空焊接, 零压降高电流开关, 等离子体-化学反应的新型式, 金属原子谱, 谱分析源, 低压电弧 (一种新的放电型式) 的可能, 钛气化泵, 离子喷涂材料源, 金属蒸气源等。Sunako 等介绍了用来产生

几毫米厚和几十毫米宽的片状等离子体的 Tokai-UI 型发生器, 可用于同位素分离, 等离子体化学过程, 蚀刻, 制造类钻石薄膜等。它包括放电区和等离子体区两部分, 等离子体区的压力只有放电区的 1/1000, 离子密度 $10^5-10^{19}/\text{m}^3$, 并进行了各种等离子体参数测量。

Kikuchi 等对硅烷混合气 He-SiH₄ 和 Ar-SiH₄ 微波放电等离子体下游的参数进行了理论和试验研究, 指出微波泄漏对等离子体参数、流速和硅烷等离子体化学有重要影响。Kaneda 等对电容耦合平行板电极氦气射频放电等离子体的平均参数分布进行了研究。放电管内径 65mm, 长 45mm, 工作频率 13.56MHz, Bolom 电路, 压力为 40, 66.66, 133.322, 400Pa。测量了电场强度、等离子体密度和电子温度等。陈克强等研究了低压 Ar 和/或 N₂ 微波放电中的击穿场强, 并研究了微波功率、气体种类、压力、磁场强度和分布对等离子体参数电子温度、离子密度和分布的影响。

Kellog 等给出了一新电子枪在 WOMBAT (磁场作用束和扰动波) 系统上的试验结果, 并同理论分析作了比较, 验证了束共振的条件, 研究了束-等离子体的不稳定性, 束-等离子体的放电。刘祖黎用冷非中性等离子体理论分析了高频表面波的不稳定性。Saishkin 等讨论了漂移振荡的试验结果及理论处理, 此振荡是发生在离子源和 Hall 离子源的 EXH 非均匀气体放电中。试验是对不同尺寸、结构和磁场分布的两个模型进行的。Kurko 等研究了束-等离子体放电产生的旋转等离子体中的两种型式的不稳定性, 一种是槽形不稳定性, 一种是离子回旋漂移不稳定性, 并对交叉的径向电场 (E) 和纵向磁场 (B) 中弱电离等离子体不稳定性提出了一个简单计算模型。竺乃宜在 $\phi 800\text{mm}$ 微波管中进行了微波传播特性的模拟试验, 工作频率 $f = 2.35\text{GHz}$, 电子密度 $n_e = 3 \times 10^{10} - 1 \times 10^4/\text{cm}^3$, 碰撞频率 $\nu = 1 \times 10^8 - 6 \times 10^6\text{Hz}$, 等离子体层厚度 $z = 4 - 80\text{cm}$ 。

在磁场作用下, 低气压 ($\sim 133 \times 10^{-4}\text{Pa}$) Ar 和 He 等离子体的放电特性存在着跳跃和滞后现象, 过去用电流-电压特性具有负微阻现象来解释, Toma 等研究了 I_d-U_d, I_d-B 特性的非线性特性, 在对上述现象解释时, 考虑了双层的因素。最近确认等离子体不稳定的能源经常存在于双层中, 一个双层代表了一个物理系统。量子过程造成这个系统电能的积累, 在一定条件下成为一个等离子体不稳定的刺激器。Sanduloviciu 等认为双层的这些性质解释了所有的自持相干电振荡、离子化波的赝波现象、等离子体中出现的非相干涨落和湍流等。同时, 研究了高频等离子体团的双层性质。试验表明, 等离子体团的边缘把等离子体分为两个部分, 各具有不同的参数 (电子浓度、电势等), 形成一个三维对称的双层。由于具有不同电荷的双层之间的静电力作用好象液体中的表面张力一样, 这就造成了高频等离子体团的自约束性质。他们还研究了外电路元件对等离子体双层不稳定性参数的影响。Talasman 等研究了等离子体双层触发过程中磁场的作用。Alexandroaei 等研究了形成于两部分负辉光等离子体之间过渡区双层的动力学。

Biborosch 对惰性气体 (He) 辉光放电周期现象进行研究, 企图在不稳定等离子体特性量归纳值之间找到一些类似于 PUPP 相似率的一些相似关系。所得结论是, 至少在阳极等离子体中, 振荡现象和传播现象都可用试验证明具有在惰性气体中通常离子化波的特殊性质。

Simionescu 等建立了一个模拟装置, 用以研究冷等离子体和生命起源。Groh 等介绍了用于通讯卫星的高性能惰性气体离子推进器 RIT 10 的情况, 过去是用水银作推进剂, 现改用氦。对 RIT 15 也作了用氦作推进剂的试验, 另外氦也是一种可能的推进剂。Freisinger 等

用质谱仪分析射频低温氢等离子体中的杂质,在最佳状态,杂质为1.1%,主要的是 C^+ , N^+ , O^+ , Si^+ ,从 CH^+ 到 CH_2^+ ,从 OH^+ 到 H_3O^+ ,从 SiH^+ 到 SiH_2^+ ,并指出杂质的量依赖于射频放电功率和放电压力。

②诊断 在低气压等离子体研究中,朗缪尔探针仍然是最重要的诊断工具。但用探针诊断低气压射频等离子体,往往由于鞘层上的射频电压的干扰和热力学不平衡而造成困难。朱文浩等同时考虑射频干扰及电子能量分布函数的不同形式,对双探针系统进行了计算,得出有关电子流、浮动电位及双探针伏安特性的计算结果,给出了确定电子平均能量的一般公式。目前对HCD离子源的机制研究得还不够,为此赵文涛等提出了离子源放电等离子体的理论模型,导出了室内等离子体密度分布和电子温度,并进行了探针测量。

③聚合和表面处理 低压高频放电等离子体聚合和材料表面处理目前非常引人注目,是一个发展活跃的领域。Kazou等研究了等离子体合成 NH_3 和热合成 NH_3 不同的催化作用。周坤焜等用高频钟罩式平板电极反应器,用等离子体聚合六甲基二硅胺烷,沉积速率与参数选择和基体位置有关,研究了聚合条件和热改性对聚合物结构的影响。通过X射线衍射,元素,差热分析和溶解度测定表明,聚合物具有交联、非晶态的结构,具有优良的耐高温和化学稳定性。伍振尧等用等离子体聚合法在半导体光电极上制备导电保护层,研究了聚合的规律性、聚合薄膜的结构、物理化学性质和聚合机制的一些问题。Hattori等研究了在X射线真空印刷过程中用等离子体聚合防染剂。真空印刷已用来制造微细图形, $4\mu \times 4\mu$ 的电子束已用于印刷。裴晋昌等用 O_2 , N_2 或空气等离子体处理聚酯物,从样品的ESCA图谱分析,认为由于含氧、含氮基团的体积阻碍效应的差异,造成基团由表面向本体内转移速率的不同,造成改性效果的差异。聚酯物在以氧等离子体引发后,可以用液相法与丙烯酸接枝,接枝率可达3%左右。丙烯酸接枝后形成的织物,其表面润湿性经反复洗涤后衰减甚微。

过去用直流辉光放电可有效地清除碳而不能清除 O_2 ,宁加元等用甲烷-氢直流辉光放电有效地清除了表面上的氧,用 H_2 放电有效地清除表面碳。洪明苑等进行了聚酯(PET),聚丙烯(PP)和兔毛的等离子体表面改性。魏月贞等用冷等离子体处理石墨纤维表面,经 O_2 等离子体处理后,层间剪切强度提高25%,抗拉强度和杨氏模量也分别提高30%和10%。Gheorghiw等用差热分析(DTA)和分子量分布(MWD)法研究了高频等离子体处理参数(RF功率、处理时间、气体种类和气体流量)对PET表面结合的影响。

熊克贵等用低压 H_2 等离子体对选择性氢化催化剂 $CuCo_3-NiCO_3$ /硅藻上进行了处理,刘学恕等对乙烯和丙烷的等离子体聚合机制进行了讨论。

Pollo等介绍了他们发展的聚酯绝缘层的臭氧发生器,过去是用玻璃作电极间的绝缘,现在改用聚酯,并对臭氧合成的动力学作了简单讨论。

④刻蚀和沉积 等离子体刻蚀和沉积是非常有前途的工艺,已经有了相当大规模的实际应用。Nasedkin等在 SF_6 和 CF_4 中用束-等离子体放电产生活化根的流量 Q 可达 $10^{21}/s$,对材料的刻蚀速率高,刻蚀硅可达 $10\mu/min$,刻蚀 SiO 可达 $4 \times 10^3 \text{ \AA}/min$ 。束-等离子体参数是压力为 $1.333 \times 10^{-2} - 6.665 \text{ Pa}$,束电子能 $E = (1-4) \text{ keV}$,束电子密度 $n = 1 \times 10^8 - 3 \times 10^9/cm^3$ 。 SF_6 , CF_4 分解率 $\alpha = 0.3-1$ 。

Kieser等发展了两种改进的平面磁控管阴极,一种用于IPT型磁控管,一种用于Hollow-IPT型磁控管。试验表明,IPT型的靶利用率高,靶污染少,靶长可达3.5m,靶

宽大。Hollow-IPT型功率密度可达 $200\text{W}/\text{cm}^2$ ，Ar的压力低，金属离子化多，溅射率高。同e型枪相比，涂层有更好的粘着力，薄膜有更好的性能。王玉魁等研究了A3钢基板磁控溅射离子镀铝膜的相组成，进行了电子探针、X射线衍射和电子衍射分析。分析表明，镀铝膜不是单质外接铝膜，而是由靶材元素和基板元素组成的合金膜。离子镀膜的相组成与基板负偏压有很大关系。陈宝清等对磁控溅射离子镀金属，应用X射线衍射，AES，TEM，SEM等方法，对镀层的成分、组织及相结构进行了分析。分析表明，基体与镀膜之间形成较宽过渡层，从而提高了镀膜的附着性。

离子喷涂愈来愈多地用于在各种基板上制备涂层如TiN。TiN涂层硬度高，耐磨损和耐蚀，摩擦系数小，能改进工具、冲模和其他机械部分的特性。张世兴研究了离子喷涂的特性和应用。

Pei-Ching Li用低于2%的硅烷沉积PECVD氮化硅薄膜，它有良好的压缩和热稳定性，是良好的绝缘体。2%的硅烷是不可燃气体，对电子工业是安全的。

Tiller用平板式等离子体化学反应器和流管式等离子体化学反应器清除有毒的卤族碳化物，用含铁的反应器去除 CCl_4 。Weakliem等对硅烷-甲烷辉光放电进行了质谱研究。在富甲烷混合气中有较高的碳氢，在几乎相等的硅烷-甲烷混合气中，只有较多的硅烷和Si-C氢化物。有各种组成的氢碳化硅薄膜和电气性能薄膜可在辉光放电中沉积而成。在硅烷-甲烷辉光放电中增加1%的二甲硼烷可沉积出透明导电薄膜，这对制作P-I-N非晶态硅电池的P层非常有用。为了研究反应中间物和机制，把No加入放电中，自由基清除剂No阻止生成较多的硅烷和固体非晶态硅薄膜。

III. 会议特点

从会议的概况和主要学术内容来看，有下述的几个特点。

1. 论文学术内容范围基本上与第7届国际等离子体化学会议(ISPC-7)相同，但还包括等离子体科学的更基础的一些东西，如气体的基本放电过程，波的传播，等离子体不稳定性，生命起源等。

2. 关于基本过程和模型的论文较多，共46篇。国外65.5篇论文中有29.5篇是关于基本过程和模型的，其中关于低气压的就有18篇。诊断方面论文较少，只有5篇(ISPC-7共37篇)。热等离子体两个重要方面的应用(冶金，熔化和气化)也不多，共16篇。

3. 国外5篇关于冶金论文中，4篇是苏联阿拉木图(Alma-Ata)能源研究所Ashimov等人提出的。国外3篇关于熔化和气化论文中，有两篇是关于喷涂的。

4. 相对来说，我国提出的热等离子体应用论文较多，有19篇，各国科学家表现了很大的兴趣。

5. 相对来说，我国提出的低气压等离子体论文较少，只17篇。其中关于基本过程和模型的只4篇，表现了我国在这方面的研究较为薄弱。而国外论文关于低气压的篇数超过热等离子体的篇数。国外非常重视等离子体技术基本理论的研究，特别是在低气压等离子体方面。

IV. 等离子体技术前景

等离子体技术经过20多年的发展，已经有了一些重要的工业应用。如英国Tioxide公司用等离子体法生产钛白粉已有20多年的历史，目前日产量达65吨。西德Hüls公司等离子

体法生产乙炔，年产10万吨。已有年产50多万公里的等离子体生产光纤工厂。等离子体法生产臭氧的工厂已达每小时几十吨的规模。西屋公司的化铁炉用等离子体熔化铁屑，每小时2.5吨；几个火法冶金转移电弧等离子体炉正在发展到工业规模。等离子体喷涂已达到机械化、机器人和计算机控制的程度。苏联第九个五年计划明确规定发展等离子体冶金基础研究。最近日本有一庞大政府计划，发展高频等离子体制取陶瓷超微粉。美国计划到1990年陶瓷材料产值将达25亿美元，首先考虑用等离子体法。在低气压等离子体方面还有一些其他的重要应用，如等离子体刻蚀可进行微米级线条加工，使集成电路高度集成化成为可能。等离子体法可聚合各种功能膜，可沉积各种超薄膜。等离子体表面处理可使各种材料（如聚酯、乙烯纤维和碳纤维等）改性，对材料表面进行碳化、氮化、硼化等可提高硬度和耐磨性几十倍。在机械、冶金、化工、半导体、医学等领域还有很多其他方面的重要应用。

但是，也应看到，等离子体技术还没有象原来期待的那样在工业中得到较普遍的应用。这主要存在着两个问题，一是经济性问题，一是技术问题。等离子体技术在装置上的优越性是可使设备小型化，自动化，可增加产量几十倍甚至几百倍。问题是在有些应用中，特别是热等离子体的应用中，电耗太大。低气压等离子体在这方面要好得多，所以发展速度非常快。在技术方面必须解决三个问题：①创造高效率长寿命的新型等离子体发生器；②解决生产工艺中对生产过程监视控制问题；③提供基本数据、物性资料和装置设计模型方法。由于技术的复杂性，等离子体技术要在工业中得到普遍应用，还需要走一段很长的技术研究路程。从发展趋势看，这方面的国际会议增多，研究力量不断增加，一定会推动这门科学技术迅速发展。

A REVIEW OF THE ICPST

Zhu Qing-wen

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract 117 papers are presented in the ICPST (International Conference on Plasma Science and Technology). Their coverage is comprehensive. They represent the recent development and achievement in this field. The proceedings of the ICPST is divided into three parts, i.e. survey papers, thermal plasmas (near equilibrium) and low pressure plasmas (non-equilibrium). In the thermal plasma field are included basic processes and modelling, diagnostics, plasma systems, melting and evaporation, metallurgy, chemical synthesis, and pyrolysis. In the low pressure plasmas field are included basic processes and modelling, diagnostics, polymerization and surface treatment, etching and deposition.

The review of the ICPST is given in this paper. The paper contains four parts, i.e. the general introduction of the ICPST, the discussion of the papers, the main features of the ICPST, and the perspective of the plasma technology.

Keywords *low temperature plasma; thermal and cold plasma; near equilibrium and non-equilibrium plasma; high and low pressure plasma*